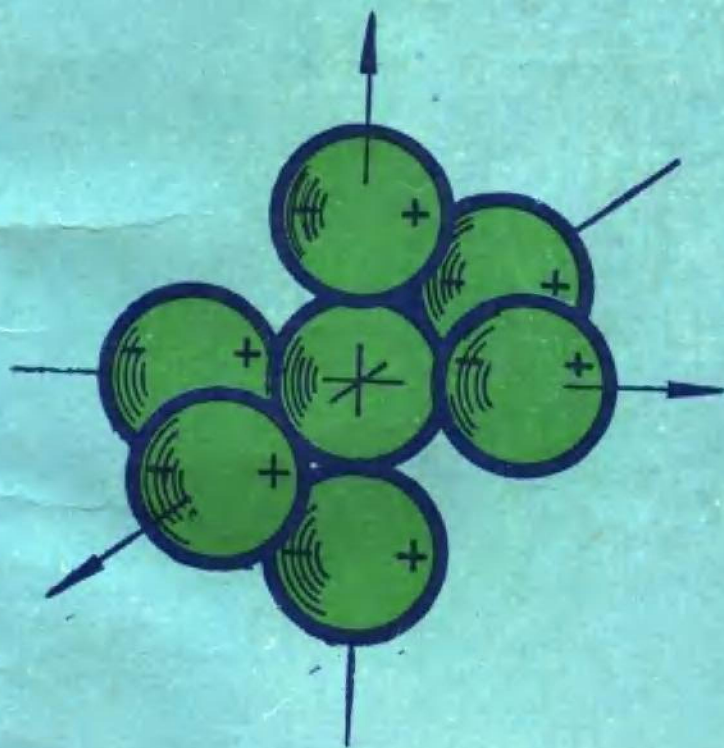


电介质物理导论

INTRODUCTION TO
DIELECTRIC PHYSICS

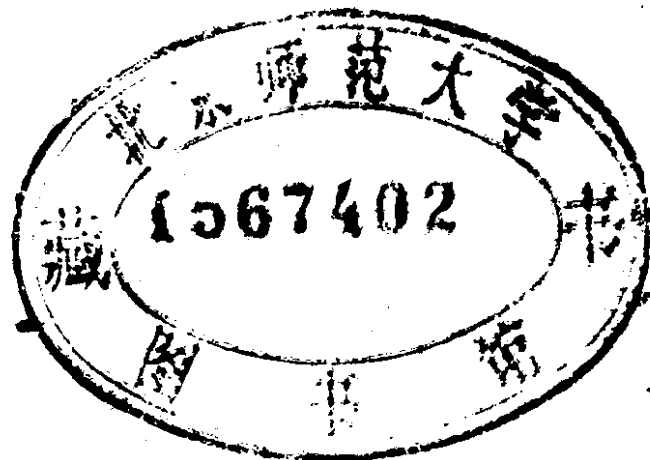


李翰如 编著

成都科技大学出版社

电介质物理导论

李翰如 编著



成都科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了电介质物理的基本理论和概念，全书共分七章：恒定电场中电介质的极化；恒定电场中电介质的电势；交变电场中电介质的损耗；介质极化与损耗理论的应用；自发极化与铁电晶体；非均匀系统和各向异性晶体的介电特性以及强电场下的介质击穿。各章内容着重介绍各类电介质在电场作用下的电物理过程及其性质和微结构之间联系的基本规律，并结合工程实例与应用作了比较详尽的分析和讨论，对于近代在电介质应用方面日益受到重视的铁电、压电等物理效应的有关基本理论以及张量概念亦作了必要的介绍。

本书可供高等工科院校电子材料、技术陶瓷、电子元器件等专业本科和专科作为教材，亦可供从事上述专业及相近专业工作的技术人员作为参考书或继续工程教育的教材。

电介质物理导论

李翰如 编著

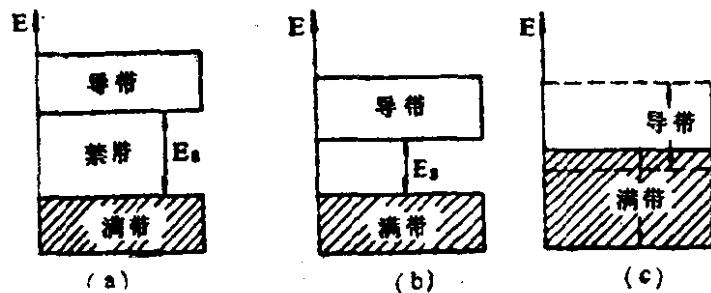
成都科技大学出版社出版 发行
四川省新华书店经销
成都科技大学印刷厂印刷
开本：850×1169 1/32 印张：14.5
字数：280千字 印数：1-2500
1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

ISBN 7-5616-0342-8/O·33

定价：5.80元

绪 论

电介质 (dielectric) 是在电场作用下具有极化能力并能在其中长期存在电场的一种物质。电介质具有极化能力和其中能够长期存在电场这种性质是电介质的基本属性，也是电介质多种实际应用（如储存静电能）的基础。静电场中电介质内部能够存在电场这一事实，已在静电学中应用高斯定理得到了证明，电介质的这一特性有别于金属导体材料，因为在静电平衡态导体内部的电场是等于零的。如果运用现代固体物理的能带理论来定义电介质，则可将电介质定义为这样一种物质：它的能级图中基态被占满，基态与第一激发态之间被这样宽的禁带隔开，以致电子从正常态激发到相对于导带的态所必须的能量，大到可使电介质受到破坏。电介质的能带结构可以用图一示意，为了便于将电介质的能带结构和半导体、导体的能带结构相比较，同一图中，也分别画出了它们的能带结构示意图。



图一 绝缘体、导体和半导体的能带模型

(a) 绝缘体 (b) 半导体 (c) 导体

二

电介质对电场的响应特性不同于金属导体。金属的特点是电子的共有化，体内有自由载流子，这样就决定了金属具有良好的导电性，它们以传导的方式来传递电的作用和影响。然而，在电介质体内，一般情况下只具有被束缚着的电荷，在电场的作用下，将不能以传导方式而只能以感应的方式，即以其中正、负电荷受电场驱使形成正、负电荷中心不相重合的电极化方式来传递和记录电的影响。尽管对不同种类的电介质，电极化的机制各不相同，然而，以电极化方式响应电场的作用，却是共同的，正因为如此，研究电介质在电场作用下发生极化的物理过程并导出相应的规律，是电介质物理的一个重要课题。

由上所述，电介质体内一般没有自由电荷，自然具有良好的绝缘性能。在工程应用上，常在需要将电路中具有不同电位的导体彼此隔开的地方使用电介质材料，就是利用介质的绝缘特性，从这个意义上讲，电介质又可称为绝缘材料 (Insulating material) 或绝缘体 (Insulator)。

工程上实际应用的电介质毕竟与理想的电介质不同，最主要的是实际电介质在电场作用下存在泄漏电流和电能的耗散以及在强电场下还可能导致电介质的破坏。因此，如果将电介质物理看成是一种技术物理，那么，除要研究极化外，还要研究有关电介质的电导、损耗以及击穿特性，这些就是电介质物理需要研究的主要问题。

三

电介质种类繁多，组成物质结构亦千差万别。我们可以从不同角度对电介质进行分类。

按物质组成特性，可将电介质分为无机电介质（如云母、玻

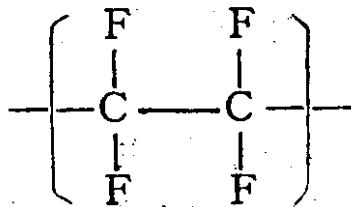
璃、陶瓷等)和有机电介质(如矿物油、纸以及其它有机高分子聚合物等)两大类。

按照物质的聚集态,则可将电介质分为气体介质(如空气)、液体介质(如电容器油)以及固体介质(如涤纶薄膜)三大类。

若按组成物质原子排列的有序化程度分类,便可将电介质分成晶体电介质(如石英晶体)和非晶态电介质(如玻璃、塑料),前者表现为长程有序,而后者只表现为短程有序。

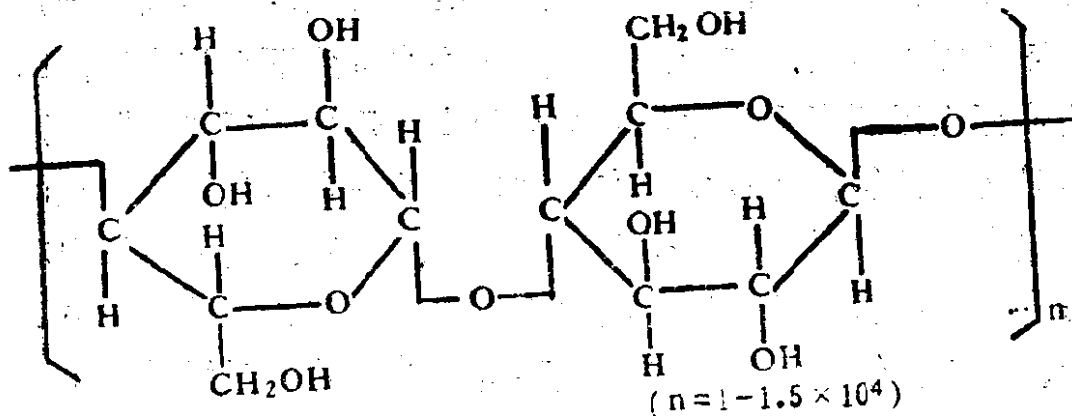
在工程应用上,还常常按照组成电介质的分子的电荷在空间分布的情况进行分类。按此分类方法,一般将电介质分为极性电介质和非极性(中性)电介质。当无外电场作用时,介质由正、负电荷中心相重合的中性分子组成,这样的介质即为非极性(中性)介质,如聚四氟乙烯薄膜、变压器油等;若由正、负电荷中心不相重合的极性分子组成,这样的介质即为极性介质,如电容器纸的主要成分——纤维素以及聚氯乙烯薄膜等。其中聚四氟乙烯和纤维素的分子结构具有一定的代表性。

聚四氟乙烯的分子结构:



(由于结构的对称性,正、负电荷中心重合,故不呈现极性)

纤维素的分子结构:



(由于分子结构中存在有极性的氢氧根,故导致纤维素的极性)

最后，如按照介质组成成分的均匀度进行分类，又可将电介质分为均匀介质（如聚苯乙烯）和非均匀介质（如电容器纸—聚苯乙烯薄膜复合介质）。

尽管可能还有别的分类方法，如将介质分成块状介质和膜状介质等，但常用的分类方法即如上述列举的那几种。

分类研究电介质，有利于将电介质性能的研究，统一在某种物质共同属性的基础之上，以便总结出宏观介电性能与微观材料结构、组成之间相互关联的规律。

四

电介质物理是以电介质为研究对象的一门学科，它从物理学中分离出来并成为一个独立分支，乃是最近几十年的事，其研究内容主要是揭示电介质基本特性（电极化、电导、介质损耗以及电介质击穿）的物理本质；探讨电介质在电场作用下所发生的物理过程与电介质的结构、组成之间关系的规律性，这种规律性给生产、研究人员提供制造、选用、研究以及开发电介质的科学依据。

电介质物理所涉及的内容，除上述外，还应包括对电介质其它特性的研究，如压电性、光弹特性等，但本书的重点将选择前述那些基础性内容，而对压电性、光弹性方面的内容仅作一般介绍，不作深入讨论，这一点，只要我们注意到下面的事实，即：后者实际上已逐渐形成专门的学科分支，例如“压电学”，那么相信读者是能够自然地接受本书对诸有关内容的安排与处理的。

电介质物理是从事电子元器件生产、试制、研究领域内科技工作人员的必备基础理论，同时也为电子学其它领域以及航天、航空、电力、能源工程领域内从事科技工作的人员提供了重要的参考知识。对于开展科题研究及实施工程继续教育来说，均具有

一定的指导价值。

五

电介质物理的发展，同样经历了与社会的科学技术一样的又分化又综合的过程。虽然，它已成为一门独立学科，但近代明显地表现为与其它学科（如晶体学、高分子材料学等）及技术应用科学交叉发展的趋势，在这样的趋势驱动之下，电介质物理的研究内容与范围正在日益扩大，例如，日前在晶体电介质应用于光电子学器件中的研究十分活跃，不少人在探索掺杂铈酸锂晶体的光电子特性；对功能电介质的研究亦同样受到重视，例如，探索陶瓷体内晶粒间的晶界效应，以实现敏感元件或发展高容量微小陶瓷电容器而深入研究 SrTiO_3 陶瓷晶界层电容器；在将陶瓷介质应用于 X-波段和毫米波微波通信、卫星直播电视方面，亦开展了令人瞩目的研究，这些研究逐步揭示了具有通式 $\text{Ba}(B_{\frac{1}{3}}B'_{\frac{1}{3}})\text{O}_3$ 的钙钛矿结构复合氧化物陶瓷介质材料的微波介电性能；此外，对高聚物及有机复合材料的介电特性研究及应用研究（压电、热释电等多功能应用）亦是电介质物理今后研究方向之一。所有这些研究动向，都表明了电介质物理学的发展，正沿着内容不断深入，研究范围不断扩大的方向不断取得新的成果，且明显地表现为电介质物理、电介质材料及电介质的应用交叉发展以及一般电介质与功能电介质交叉发展的总趋势。

目 录

绪 论

第一章 恒定电场中电介质的极化	(1)
§1-1 静电学基本定律.....	(1)
1.1.1 一组电荷的作用力、电场和电势.....	(1)
1.1.2 高斯定理与两个平行极板间的电场.....	(3)
§1-2 介电常数和介质极化.....	(6)
1.2.1 介电常数.....	(6)
1.2.2 电极化强度.....	(7)
1.2.3 极化的微观描述.....	(12)
§1-3 有效电场.....	(15)
§1-4 克劳修斯-莫索蒂方程.....	(20)
§1-5 极性液体介质的有效电场.....	(29)
§1-6 电子位移极化.....	(40)
1.6.1 具有一个点状核的球状负电壳体模型.....	(40)
1.6.2 圆周轨道模型.....	(42)
§1-7 离子位移极化.....	(46)
§1-8 转向极化.....	(55)
§1-9 热离子极化 (离子松弛极化)	(62)
§1-10 空间电荷极化.....	(69)
第二章 恒定电场中电介质的电导	(73)
§2-1 电介质电导总论.....	(73)
§2-2 气体介质的电导.....	(79)

2.2.1	气体中的载流子浓度	(80)
2.2.2	气体中离子的迁移率	(83)
§2-3	液体介质的电导	(85)
2.3.1	液体介质的离子电导	(86)
2.3.2	液体介质的电泳电导	(91)
§2-4	固体介质的电导	(95)
2.4.1	固体介质的离子电导	(96)
2.4.2	固体介质的电子电导	(112)
§2-5	固体介质的表面电导	(120)
§2-6	直流电场下介质的绝缘电阻与能量损耗	(124)
第三章	交变电场中电介质的损耗	(127)
§3-1	复介电常数和复折射率	(127)
3.1.1	复介电常数	(127)
3.1.2	电磁波在介质中的传播及复折射率	(130)
§3-2	介质损耗	(134)
§3-3	弛豫现象	(140)
§3-4	Kramers-Krönig 关系式	(145)
§3-5	德拜方程	(148)
§3-6	电介质的弛豫机构与松弛时间	(154)
3.6.1	极性液体的德拜模型	(154)
3.6.2	极性固体的德拜理论	(158)
3.6.3	离子型固体介质的弛豫机构与松弛时间	(161)
§3-7	介质损耗与温度的关系	(169)
§3-8	计及漏电导时的介质损耗	(173)
§3-9	有损耗电介质的等效电路	(177)
第四章	介质极化与损耗理论的应用	(182)
§4-1	气体电介质的极化和损耗	(182)

§4-2	液体电介质的极化和损耗	(188)
4.2.1	纯液体的极化	(188)
4.2.2	混合液体的极化	(194)
4.2.3	液体介质损耗	(195)
§4-3	固体电介质的极化和损耗	(200)
4.3.1	原子和分子构成的固体介质的极化与损耗	(200)
4.3.2	离子构成的固体电介质的极化与损耗	(216)
第五章	自发极化与铁电晶体	(252)
§5-1	自发极化与铁电体概论	(252)
§5-2	铁电晶体分类	(258)
§5-3	离子晶体产生自发极化的条件与居里-外斯 定理	(265)
§5-4	位移型铁电体自发极化的微观理论	(271)
§5-5	有序-无序型铁电体自发极化的微观机理	(289)
§5-6	铁电体的电畴结构	(297)
§5-7	铁电体的热力学理论概述	(304)
§5-8	反铁电体、压电体与热释电体	(311)
第六章	非均匀系统和各向异性晶体的介电特性	(323)
§6-1	非均匀系统的介电特性	(323)
§6-2	张量的概念	(332)
§6-3	各向异性晶体性质的张量表示	(347)
第七章	强电场下的介质击穿	(374)
§7-1	电介质击穿总论	(374)
§7-2	气体介质的击穿	(377)
7.2.1	碰撞游离理论及流柱理论	(378)
7.2.2	沿固体介质表面的气体放电	(397)

§7-3	液体介质的击穿.....	(401)
7.3.1	液体介质击穿现象的经验规律.....	(402)
7.3.2	液体介质击穿的机理.....	(405)
7.3.3	杂质和水分对液体介质击穿的影响.....	(413)
§7-4	固体介质的击穿.....	(418)
7.4.1	固体电介质的热击穿理论.....	(420)
7.4.2	固体电介质的电击穿.....	(424)
§7-5	固体介质击穿的实验结果.....	(437)
§7-6	因局部放电引起的固体介质击穿.....	(447)

第一章 恒定电场中电介质的极化

本章内容提要

本章重点研究电介质在恒定电场作用下，所发生的电极化过程。全章采用的主要研究方法是先给出必要的静电学基本定律和公式，在此基础之上从宏观与微观两种角度，分析与讨论电介质极化的共同规律，然后，结合具体物质结构类型，分别讨论各种形式极化的机理并导出各自所遵循的规律。重点在于了解宏观极化特性与微观物质结构及组成之间的联系，以揭示相应物理现象的本质。从工程应用角度，还详细介绍了若干极化理论、公式的适用范围，以帮助读者在实际工作中正确应用理论与公式，同时掌握相应的物理概念。

电介质作为一类重要的电子材料，广泛应用于各种电子、电工仪器设备中，它的性质决定于在电场作用下其物质内所发生的物理现象和过程。在远离击穿强度的电场作用下工作的电介质，通常可用两个基本参数来表征：介电常数“ ϵ ”和电导率“ γ ”（或交流电压下的“ $\text{tg}\delta$ ”值）。这些基本参数的大小，就是对在电场作用下电介质所发生的物理现象的定量评价，其中介电常数 ϵ 是表征电介质极化的基本物理量。研究电介质的极化过程，广泛涉及到静电学定律和有关物质结构的知识，以探求极化与物质结构间的关系。

§1-1 静电学基本定律

1.1.1 一组电荷的作用力、电场和电势

若有两个点电荷 q_1 和 q_2 ，彼此相距 r ，则根据库仑定律，其间的的作用力为：

$$\vec{F} = K \frac{q_1 q_2}{\epsilon_r r^2} \vec{r}_{12} \quad (1-1)$$

式中 ϵ_r 为相对介电常数； K 为比例常数，其大小与所采用的单位制有关，如电量 q 用库仑，距离 r 用米，力 F 用牛顿，则由实验测定

$$K \approx 9 \times 10^9 \text{牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2,$$

但在实际问题中，直接应用库仑定律的机会较少，常用的是其它推导出来的公式。为简化起见，在国际单位制 (SI) 中，将 K 写成

$$K = 1/4\pi\epsilon_0, \quad \vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2} \vec{r}_{12},$$

或
$$\epsilon_0 = 1/4\pi K = 1/36\pi \times 10^9 = 8.85 \times 10^{-12} \text{库}^2 / \text{牛} \cdot \text{米}^2 \\ \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{法拉/米}.$$

ϵ_0 称为真空介电常数。

任一电荷系统的周围均有库仑力 F 的作用，其能影响的区域称为电场。设有一点电荷 Q ，在距离该点电荷为 r 处的电场强度为

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2} \quad (1-2)$$

一组电荷所产生的电场具有叠加性质，如果有点电荷 q_1 与 q_2 ，其在 P 点所产生的电场强度分别为 E_1 与 E_2 ，于是， P 点的总的电场强度应为： $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ 。推广之，若有几个点电荷共同作用于 P 点，则 P 点的总的电场强度应为各个点电荷分别

作用在P点的电场强度的矢量和，即：

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n \quad (1-3)$$

这种“电场叠加定理”对下面分析电介质中电场的作用十分有用。

在静电学中，电场强度可以理解为电势的梯度，因此，与一个点电荷Q相距r处的电势即可表示为

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r} \quad (1-4)$$

电势 φ 的单位为伏特。一组电荷所产生的电势是由其中各个电荷所产生的。了解如何计算组成物质的各种电荷所产生的电势是非常重要的，因为电介质的许多电学性质的讨论都是与电势计算相关联的。

1.1.2 高斯定理与两个平行极板间的电场

电场强度是矢量，若能设法变为标量（如电荷或电荷密度）来解决电场问题将方便得多，高斯定理正是实现这一变换的重要公式。设所取曲面包围的区域内没有电荷，那么，从曲面一侧进入的任何一条电力线，一定在曲面上其它一点离开曲面。只有当这空间区域内有电荷存在时，电力线才能发自或终止这一空间区域内，此时严格的数学表述为

$$\left. \begin{aligned} \oint E \cos\theta dA &= 4\pi Kq, \\ \oint E_{\perp} dA &= 4\pi Kq, \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 $E_{\perp} dA = E \cos\theta dA$ 为垂直穿过曲面上任一面积元 dA 的电通量。因此，式 (1-5) 可表述为：穿出一个闭合曲面的总的电

通量是与该曲面所包围的电荷量成正比的。代入K值后，式(1—5)可写成 $\oint \mathbf{E}_\perp dA = q/\epsilon_0$ ，这一表达式适用于单一电荷。如对任何电荷分布要写出其表达式，只须将此式加以推广，即

$$\oint \mathbf{E}_\perp dA = \frac{\Sigma q}{\epsilon_0} \quad (1-6)$$

因为电位移 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ ，将此关系式代入式(1—5)并计及有介质的情况，即得到

$$\oint_s \mathbf{D} dA = q = \int_v \rho dV \quad (1-7)$$

高斯定律与库仑定律均根据相同实验结果得出，但由于高斯定理的各个表达式的右端只涉及标量(电荷量 q 或电荷密度 ρ)，故在许多情形下用以解决电场问题是要方便得多的。

作为高斯定理的具体应用，可以方便地计算出“无限大”的均匀带电平行极板间的电场。平行极板系统的电场分布示于图1—1。两片均匀带电极板各自的电场如图1—2所示。

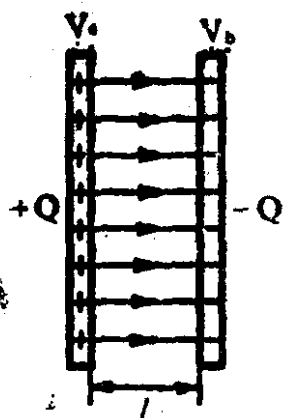


图 1-1 均匀带电
平行极板的电场

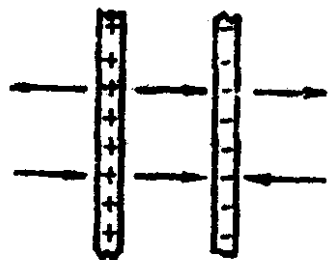


图 1-2 两片均匀带
电平行极板
各自的电场

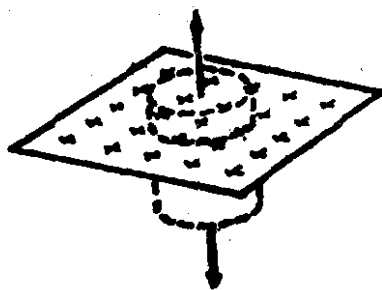


图 1-3 正极板作出
封闭圆柱面

现取出两片极板中的任何一片极板，利用高斯定理来计算均匀带电平面的电场。

作一封闭圆柱面，经过平面的中部（见图1—3），轴线和平面正交，底面积为A。显而易见，通过圆柱的曲面部分的电通量是等于零的，而通过两底面的电位移线均与底面正交，且都是向外的。

设E为两底面上的场强，则通过两底面的电通量，等于通过整个封闭面的电通量，为： $E A + E A$ 。柱面所包围的电荷为 $\sigma_0 A$ （ σ_0 为每单位面积上的电荷，称为电荷面密度，由于均匀带电，此面的 σ_0 处处相等），按照高斯定理得

$$E A + E A = \frac{\sigma_0 A}{\epsilon_0} \quad (\text{真空中})$$

所以
$$E = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \quad (1-8)$$

由式（1—8）算出的场强，实际上是一个极板单独产生的场强，即相当于 E_A 或 E_B 。现在再计算图1—2所示两个平行极板间的电场。显然，两平板所产生的电场E是每一平板单独产生的场强 E_A 和 E_B 的矢量和：

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B$$

在两平板间， E_A 和 E_B 都从A板（荷正电）指向B板（荷负电），故总的场强为

$$E = E_A + E_B = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1-9)$$

在两平板的外侧， E_A 和 E_B 是反方向的，所以总电场强度为

$$E = E_A - E_B = 0$$

由此可见，均匀地分别带有正、负电的两平行极板，只要板面的线度远大于两极板间的距离时，除了边缘附近以外，电场全